

# 基于双直角分束器的反射式静态傅里叶 光谱仪光学系统

李晚侠<sup>1,2</sup>, 卢启鹏<sup>1</sup>, 宋 源<sup>1,2</sup>, 于新洋<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 基于双直角分束器设计了一种反射式静态傅里叶变换光谱仪光学系统,并搭建了样机。该光谱仪光学系统的分光装置采用双直角分束器,其他光路全部采用反射式结构,有效折叠光路,与透射式静态傅里叶光谱仪相比,系统体积减小一半以上。用汞灯作为静态傅里叶光谱仪光源时,得到了 404.7,435.8,546.1,577.0 nm 的峰值谱线,实验结果很好地复原了汞灯实际光谱;用波长为 650 nm 的激光进行实验,光谱分辨率约为 5.93 nm,与理论计算结果基本相符。该光学系统具有结构紧凑、体积小、重量轻、抗震性强等诸多优点,可为小型化、便携式静态傅里叶光谱仪器的研制提供技术支持。

**关键词** 测量; 静态傅里叶光谱仪; 双直角分束器; 光谱分辨率; 结构紧凑

**中图分类号** O438.2 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0812004

## Reflective Static Fourier Spectrometer Optical System Based on Double Right-Angle Beam Splitter

Li Wanxia<sup>1,2</sup>, Lu Qipeng<sup>1</sup>, Song Yuan<sup>1,2</sup>, Yu Xinyang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** An optical system of reflective static Fourier transform spectrometer is designed based on the double right-angle beam splitter, and the prototype is built. The light splitting device of the spectrometer optical system adopts double right-angle beam splitter, and the other optical paths adopt the reflective structure to fold the optical path effectively. Compared with the transmission-type static Fourier spectrometer, the volume of the system is reduced by more than half. The peak spectrum lines of 404.7, 435.8, 546.1, 577.0 nm are obtained by using mercury lamp as the light source of static Fourier spectrometer. The result shows that the actual spectrum of the mercury lamp is well reconstructed. The experimental results show that the spectral resolution is about 5.93 nm at the laser wavelength of 650 nm, which is consistent well with the result of theoretical calculation. The optical system has many advantages, such as compact structure, small size, light weight, strong seismic resistance, etc. It can provide the technical support for the development of miniaturized and portable static Fourier spectrometer.

**Key words** measurement; static Fourier spectrometer; double right-angle beam splitter; spectral resolution; compact structure

**OCIS codes** 120.4570; 120.6200; 300.6190; 300.6550

**收稿日期:** 2017-03-29; **收到修改稿日期:** 2017-04-23

**基金项目:** 国家自然科学基金(61308067,61475155)、应用光学国家重点实验室自主基金、产学研协同创新重大专项(201604046019)

**作者简介:** 李晚侠(1992—),女,硕士研究生,主要从事光学设计与光谱分析方面的研究。

E-mail: liwanxia92@foxmail.com

**导师简介:** 卢启鹏(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事光谱仪方面的研究。

E-mail: luqipeng@126.com(通信联系人)

# 1 引 言

光谱仪可以对样品进行定性和定量分析,在化工、生物医药、环境监测等诸多领域有着广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。相对于棱镜、光栅等类型的光谱仪,傅里叶变换型光谱仪具有良好的波长精度、高光通量、高灵敏度、高分辨率、高信噪比以及宽光谱范围等优势,可对样品中的低含量成分进行高精度分析,是现阶段实验室型近红外光谱仪(NIRS)的主导产品<sup>[3-4]</sup>。但是传统的傅里叶型光谱仪使用的元件数量较多,难以实现紧凑型结构,且移动部件限制了仪器的机械稳定性,对使用和放置环境有严格的要求,难以满足野外探测、环境监测等户外使用需求。因此,为拓展高精度傅里叶型光谱仪的应用领域,研究性能稳定的便携式、小型化仪器具有重要意义及应用价值。

传统的傅里叶光谱仪设有驱动装置,会引起机械磨损,减少光谱仪寿命,并且不利于小型化生产<sup>[5]</sup>。而静态傅里叶光谱仪采用静态双光束干涉方式,避免采用运动部件,具有体积小、稳固性高等优点,近年来成为研究热点<sup>[6]</sup>。静态傅里叶光谱仪一般由前置物镜、分束器及后置光学系统构成,后置光学系统一般采用沿光轴的透射式结构<sup>[7]</sup>。为了研究结构紧凑的静态傅里叶光谱仪,国内外学者针对分束器做了许多设计优化工作<sup>[8-10]</sup>。现有的研究在一定程度上减小了系统的体积,但是整机造价成本和对使用环境的要求仍然较高。

为了进一步减小静态傅里叶光谱仪光学系统的体积,加强整个光学系统的紧凑性与实用性,本文基于双直角分束器设计了一种反射式静态傅里叶光谱仪光学系统。该光谱仪光学系统除分束器外全部采用反射式结构,在同等光程下体积仅为透射式光学系统的一半,具有结构紧凑、质量轻、机械性能稳定的优点。

## 2 分束器选型与计算

### 2.1 分束器的选型

静态傅里叶光谱仪常见的分束器有 Sagnac 结构<sup>[11-12]</sup>,迈克耳孙结构<sup>[13]</sup>,马赫-曾德尔结构<sup>[14]</sup>等。其中 Sagnac 型分束器不需要动镜,性能稳定、环境适应能力强,是国内外常用的典型干涉结构。Sagnac 型分束器由分束面和两块反射镜组成,如图 1 所示。近年来,出现了与 Sagnac 结构相似的双直角分束器结构,由分束面和两块直角反射镜组成,如图 2 所示。Sagnac 型与双直角型分束器都通过横向剪切分光,光在分束面处被分为两束,由于分束面两侧不完全对称,经  $M_1$  与  $M_2$  反射镜反射后,出射光束被剪切成两条出射光轴,所得两个虚光源相干。

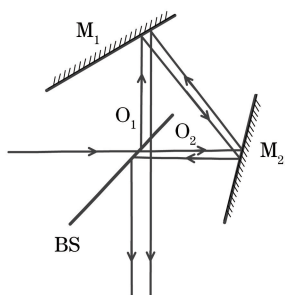


图 1 Sagnac 型分束器

Fig. 1 Sagnac beam splitter

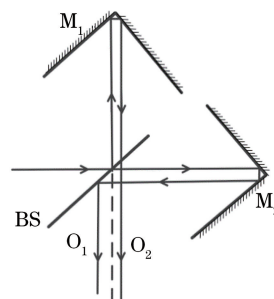


图 2 双直角型分束器

Fig. 2 Double right-angle beam splitter

国外学者经过理论分析比较,证实了双直角型分束器结构比 Sagnac 型结构更为紧凑,性能优势更为显著<sup>[15-16]</sup>。此外,由于分束面透射率的影响,Sagnac 出射的两束光易造成光强不一致,影响条纹对比度;而经双直角型分束面的两束光线  $O_1$  和  $O_2$  在分束面都发生了一次反射一次透射,两束出射光的光强相同,故双直角型对分束膜的透反比要求相对较低。实体分束器能够增加系统的稳固性,两种结构都可以做成实体形式,其中双直角型由图 3 所示的两块直角梯形棱镜构成,更易于加工、粘合。综上所述,相比于 Sagnac 型分束器,双直角型具有结构紧凑、膜透反比要求低、便于加工等优势,因此选用双直角型分束器作为静态傅里叶光谱仪光学系统的分束装置。

### 2.2 双直角分束器参数的计算

选用的实体双直角分束器采用两块直角梯形棱镜胶合构成,如图 3 所示。棱镜的尺寸由光谱仪的性能

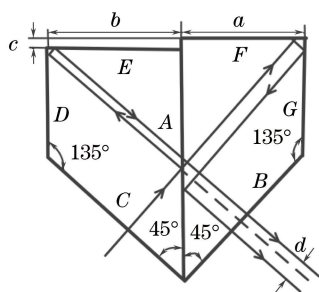


图 3 实体双直角分束器

Fig. 3 Solid double right-angle beam splitter

要求决定。根据奈奎斯特采样定理,两个取样间隔至少要取得一个完整的波长才能复原光谱,因此根据下限波长可得到干涉图最大采样间隔为:

$$\Delta \leq \frac{1}{2\sigma_{\max}}, \quad (1)$$

式中  $\sigma_{\max}$  为最大波数,设计的光学系统下限波长  $\lambda_{\min} = 400 \text{ nm}$ ,  $\sigma_{\max} = 25000 \text{ cm}^{-1}$ 。根据

$$\Delta = s \cdot \theta, \quad (2)$$

式中  $s$  为像元间距,大小为  $13 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $\theta$  为剪切角,可以计算出理论的最大剪切角为  $\theta = 0.0154 \text{ rad}$ 。剪切距为:

$$d = f' \cdot \theta \approx 2 \text{ mm}, \quad (3)$$

式中  $f'$  为傅里叶透镜焦距,大小为  $130 \text{ mm}$ 。

两块直角棱镜的尺寸及错开的微小分量  $c$  决定最大剪切量为:

$$d = \sqrt{2}(b - a + c), \quad (4)$$

当  $b - a = c$  时,有:

$$d = 2\sqrt{2}c, \quad (5)$$

因此可以计算出两块棱镜的错位量  $c = 0.707 \text{ mm}$ 。

干涉仪的光程差越小,得到的干涉条纹越稀疏,光程差越大,得到的干涉条纹越密集,光谱分辨率与最大光程差成反比。最大光程差可由探测器尺寸及剪切角求出,即:

$$L = \frac{dN_s s}{2f'}, \quad (6)$$

式中  $N_s$  为像元数。

光谱分辨率为:

$$\delta\Delta = \frac{1}{2L}. \quad (7)$$

### 3 光学系统结构

#### 3.1 系统结构与原理

如图 4 所示,静态傅里叶光学系统由前置光学系统、双直角分束器、后置光学系统构成。其中,球面镜 1 和三角反射镜构成前置物镜组,球面镜 2 和柱面镜构成后置光学系统,除分束器外,其他结构全部采用反射式结构。

前置光学系统将目标会聚于傅里叶透镜(球面镜 2)的前焦面(狭缝)处,通过双直角剪切分束器得到两个目标虚光源,通过傅里叶透镜在其出瞳面上产生具有微小夹角的相干平面波,经柱面镜压缩光束口径,在傅里叶透镜的后焦面上得到干涉信息,并由探测器接收。

#### 3.2 前置光学系统

如图 4(a)中前置物镜所示,前置光学系统由狭缝、球面镜及三角平面镜组成。球面镜焦距  $f'_1 = 45 \text{ mm}$ , 孔径  $D_1 = 14 \text{ mm}$ , 平行光入射球面镜,在球面镜的焦点处聚焦,狭缝位于焦平面处。狭缝大小和形状与光谱

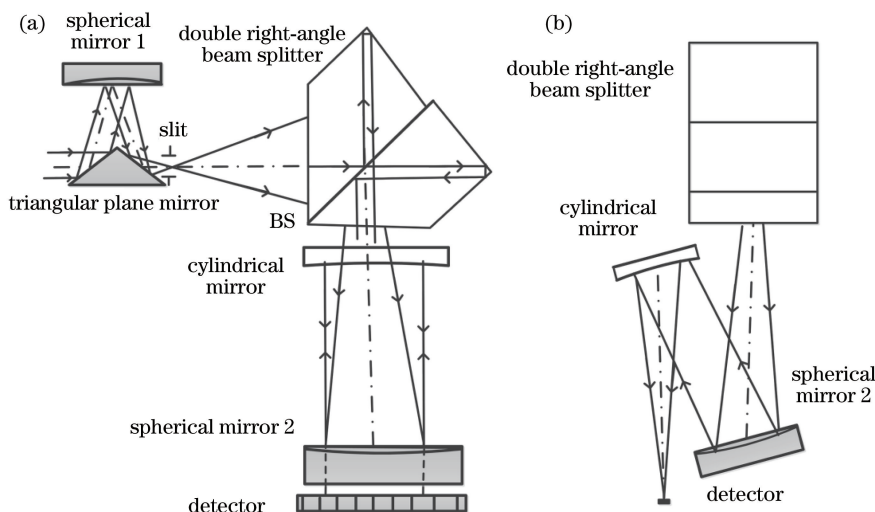


图 4 反射式静态傅里叶光谱仪光学系统。(a)俯视图;(b)右视图

Fig. 4 Optical system of reflective static Fourier spectrometer. (a) Top view; (b) right view

分辨率无关,只影响光通量和空间分辨率,因此可以适当增加狭缝宽度,来增加光通量。前置光学系统的聚焦面即是入射光阑位置,也是球面镜 2 的前焦平面。

### 3.3 后置光学系统

在后置光学系统中,球面镜 2 在此结构中起到傅里叶透镜的作用,在后焦平面上形成干涉图。由于柱面镜子午面起平面镜的作用,只改变光束方向,在弧矢面上将光束压缩,增大了面阵探测器接收的能量,提高了信噪比。理想情况下,点光源入射时,在球面镜后焦平面得到一条压缩的亮线。其中球面镜焦距  $f' = 130$  mm,由探测器及分束器尺寸可以确定球面镜通光口径约为 14 mm,预留 2 mm 加工量取球面镜孔径  $D = 16$  mm;柱面镜焦距  $f'_c = 60$  mm,预留 2 mm 加工余量取孔径  $D_c = 14$  mm。

利用 Zemax 软件对后置等效光路进行仿真,传统透射式结构与反射式结构光路如图 5 所示。

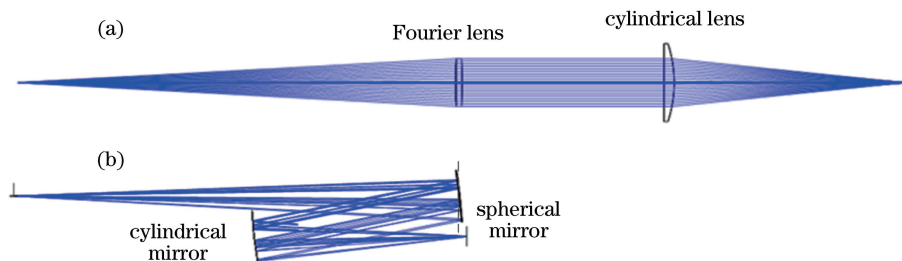


图 5 后置光路图。(a)透射式;(b)反射式

Fig. 5 Rear light path. (a) Transmission-type; (b) reflection-type

如图 5 可知,相比于透射式结构,反射式可通过折转光束,有效地简化光路结构。在同等光程条件下,反射式结构体积只有透射式结构的一半,较大程度地缩小了光谱仪光学系统的体积。同时,反射式结构可有效避免色差对系统的影响。此外,透镜对近红外、红外光的透射率受材料限制,而反射式结构在可见-红外谱区均有良好的反射特性,可较大程度地扩展光谱有效范围,为此结构在近红外领域的研究奠定基础。为了有效地解决反射式结构中的遮光问题,需合理设计球面镜和柱面镜的倾斜角度。若倾斜角度过小,柱面镜遮挡入射光束,将严重影响实验结果;若倾斜角度过大,系统会在空间高度上增加尺寸,进而增大系统的体积。综合考虑光束遮挡及结构紧凑性因素,经过仿真分析,设置球面镜和柱面镜倾角为  $6^\circ$ 。

## 4 实验与分析

实验样机装置如图 6 所示,样机大小为  $130$  mm  $\times$   $100$  mm  $\times$   $90$  mm。探测器选用面阵 Aptina AR0130,其像元大小为  $3.75$   $\mu\text{m}$   $\times$   $3.75$   $\mu\text{m}$ ,像素数为  $1280$  pixel  $\times$   $960$  pixel。

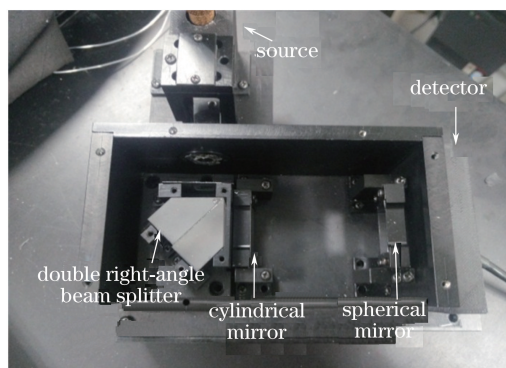


图 6 反射式静态傅里叶光谱仪样机

Fig. 6 Prototype of reflective static Fourier spectrometer

采用 LHM254 汞灯作为实验光源,此光源有 404.7,435.8,546.1,577.0 nm 等多条特征谱线。理想情况下经柱面镜压缩,在探测器处接收的是一条带有干涉信息的亮线,实际所得为有一定宽度的亮区域,如图 7 所示,其中图 7(a)是采用单狭缝时采集的干涉图,图 7(b)是采用双狭缝时采集的干涉图。

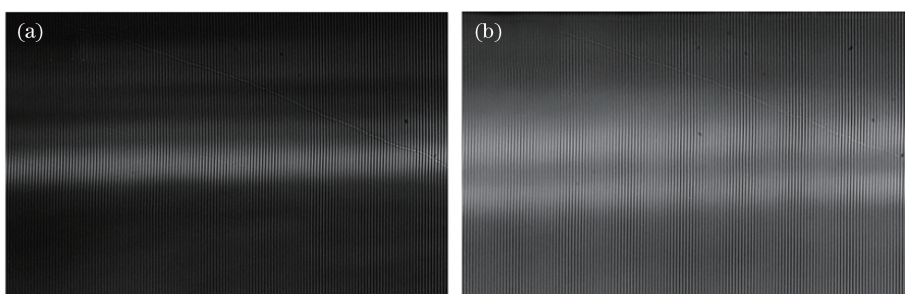


图 7 汞灯干涉图。(a)光束通过单狭缝;(b)光束通过双狭缝

Fig. 7 Interferograms of mercury lamp. (a) Light source through single slit; (b) light source through double slits

采用单狭缝时,经过分析,狭缝具有一定宽度,所得的亮区域高度与狭缝高度大小相等;当狭缝宽度减小时,干涉亮区域宽度减小。为进一步验证系统设计的合理性,如图 7(b)采用双狭缝,相当于两个光源进入系统,干涉信息集中在两个亮区域,可验证设计的光谱仪光学系统原理的正确性。对得到的干涉数据进行处理,得到如图 8 所示的干涉曲线及复原光谱。由于 Aptina AR0130 探测器响应度的影响,集中在 400~600 nm 的汞灯光谱较为明显,从图 8(b)中可以看出,404.7,435.8,546.1,577.0 nm 的光谱能够识别探测,复原光谱与汞灯实际光谱之间得到了很好的吻合。

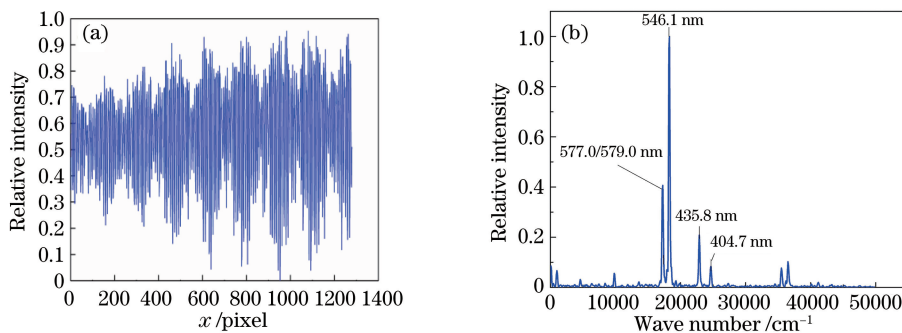


图 8 处理干涉数据后得到的(a)干涉曲线和(b)复原光谱

Fig. 8 (a) Interference curve and (b) reconstruction spectrum obtained by processing the interference data

采用 650 nm 的单波长激光进行实验,得到的干涉曲线和复原光谱如图 9 所示。此光谱仪光学系统的理论剪切角为 0.0154 rad,将实验中所用探测器参数代入(6)式和(7)式,计算得到 650 nm 下的理论光谱分辨率为 5.7 nm ( $135 \text{ cm}^{-1}$ )。将图 9(b)中峰值经过洛伦兹拟合,650 nm 处的光谱分辨率约为 5.93 nm

( $141\text{ cm}^{-1}$ ), 实验结果与理论结果基本一致, 验证了光学设计的可行性。为提高光谱分辨率, 下一步工作将对系统作进一步的改进优化。

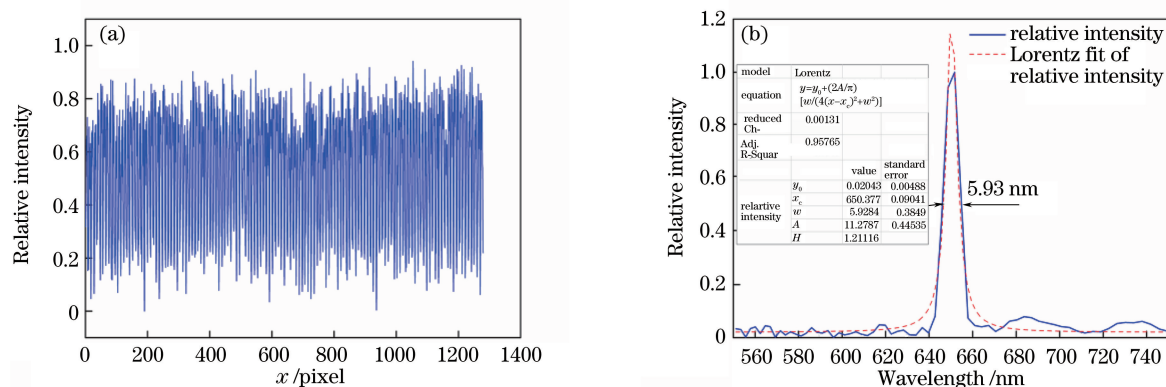


图 9 光源为 650 nm 时的(a)干涉曲线和(b)复原光谱

Fig. 9 (a) Interference curve and (b) reconstruction spectrum with the light source of 650 nm

## 5 结 论

基于双直角分束器设计了反射式静态傅里叶光谱仪光学系统。该光学系统选用的双直角型分束器与 Sagnac 型分束器相比, 具有结构紧凑、对分束膜的透反比要求低、易于加工等优势。基于实体双直角分束器, 设计的静态傅里叶光谱仪光路系统除分束器外全部采用反射式结构, 有效折叠光路, 在同等光程条件下, 该光学系统的体积小于透射式结构的 1/2; 此外, 采用反射式结构不会引起色差, 并能够扩宽光谱的有效范围。实验结果表明, 利用设计的光谱仪光学系统能够很好地复原汞灯光谱; 用 650 nm 的单波长得到的光谱分辨率约为 5.93 nm, 与理论计算结果基本相符, 实验验证了此系统的合理性及可行性。所设计的反射式静态傅里叶光谱仪光学系统具有体积小、质量轻、稳定性高等诸多优点, 对小型化、便携式静态傅里叶光谱仪器的研究具有参考意义。

## 参 考 文 献

- [1] Shi Junfeng, Hui Mei, Wang Dongsheng, *et al.* Micromation and applications of spectrometers[J]. Optical Technique, 2003, 29(1): 13-16.  
史俊锋, 惠梅, 王东生, 等. 光谱仪的微型化及其应用[J]. 光学技术, 2003, 29(1): 13-16.
- [2] Xiangli Bin, Zhao Baochang, Xue Mingqiu. Spatially modulated imaging interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(1): 18-22.  
相里斌, 赵葆常, 薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术[J]. 光学学报, 1998, 18(1): 18-22.
- [3] Zhang Chunmin, Xiangli Bin, Zhao Baochang, *et al.* The latest developments of technique of interference imaging spectrometer[J]. Optical Technique, 2000, 26(3): 232-234.  
张淳民, 相里斌, 赵葆常, 等. 干涉成像光谱仪技术的新发展[J]. 光学技术, 2000, 26(3): 232-234.
- [4] Yu Xinyang, Lu Qipeng, Gao Hongzhi, *et al.* Current status and prospects of portable NIR spectrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(11): 2983-2988.  
于新洋, 卢启鹏, 高洪智, 等. 便携式近红外光谱仪现状及展望[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(11): 2983-2988.
- [5] Li Jianhua, Xue Feng, Xue Lian, *et al.* Performance test of Fourier transform infrared imaging spectrometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(10z): 191-197.  
李建华, 薛峰, 薛莲, 等. 红外傅里叶变换成像光谱仪关键参数测试[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10z): 191-197.
- [6] Fu Jianguo, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. Tolerance analysis for a static Fourier-transform infrared spectrometer based on multi-micro mirrors[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0607002.  
付建国, 梁静秋, 梁中翥. 静态傅里叶变换红外光谱仪的公差分析[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0607002.
- [7] Tang Yuanhe, Chen Guangde, Zhao Zhenyu, *et al.* Optical throughput of modified Sagnac imaging interferometer[J].

- Acta Optica Sinica, 2007, 27(8): 1490-1493.  
唐远河, 陈光德, 赵振宇, 等. 改型萨尼亚克成像干涉仪的光通量[J]. 光学学报, 2007, 27(8): 1490-1493.
- [8] Zheng Yuquan, Wang Hui, Wang Yifan. Selection and design of optical systems for space borne hyper spectral imagers [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(11): 2629-2637.  
郑玉权, 王 慧, 王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(11): 2629-2637.
- [9] Ferrec Y, Taboury J, Sauer H, *et al.* Compactness of lateral shearing interferometers[J]. Applied Optics, 2011, 50(23): 4656-4663.
- [10] Barducci A, Castagnoli F, Marcoianni P, *et al.* The ALISEO instrument: further improvements of calibration methods and assessment of interferometer response[C]. SPIE, 2005, 5978: 461-470.
- [11] Tang Yuanhe, Guo Ting, Gao Haiyang. Modulation transfer function of modified Sagnac imaging interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1651-1655.  
唐远河, 郭 挺, 郭海阳. 改型 Sagnac 成像干涉仪的调制传递函数研究[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1651-1655.
- [12] Sellar R G, Rafert J B. Effects of aberrations on spatially modulated Fourier transform spectrometers[J]. Optical Engineering, 1994, 33(9): 3087-3092.
- [13] Xu Rongwei, Liu Hongzhan, Liu Liren. Phase-shifting vectorial-shearing interferometer with Mach-Zehnder configuration[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(2): 269-274.  
徐荣伟, 刘宏展, 刘立人. 马赫-曾德尔型相移矢量剪切干涉仪[J]. 光学学报, 2006, 26(2): 269-274.
- [14] Tang Yi, Ni Guoqiang, Liao Ningfang, *et al.* Spatial modulation imaging spectrometer based on the Michelson interferometer[J]. Optical Technique, 2007, 33(3): 427-429.  
唐 义, 倪国强, 廖宁放, 等. 基于迈克耳逊干涉仪的空间调制型干涉成像光谱仪[J]. 光学技术, 2007, 33(3): 427-429.
- [15] Moreno I, Paez G, Strojnik M. Compact reversal rotationally shearing interferometer[C]. SPIE, 2003, 5152: 365-372.
- [16] Ferrec Y, Taboury J, Sauer H, *et al.* Optimal geometry for Sagnac and Michelson interferometers used as spectral imagers[J]. Optical Engineering, 2006, 45(11): 115601.